

**FACTORES QUE HAN LIMITADO LA IMPLEMENTACIÓN Y GASTO EFICIENTE DE LOS SISTEMAS
DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES EN COLOMBIA**



AUTORES

CARMEN RUTH BELTRAN ALMEGICA
DIEGO ARMANDO RIVERA FAJARDO

Trabajo de grado presentado como requisito para optar al título de:
INGENIERO CIVIL

Director:
DAVID PEÑA GARCIA

**UNIVERSIDAD MILITAR NUEVA GRANADA
FACULTAD DE ESTUDIOS A DISTANCIA
INGENIERIA CIVIL
BOGOTÁ, DICIEMBRE 2020**

RESUMEN

Dada la importancia de los recursos hídricos en Colombia, se han implementado diferentes Sistemas del Tratamiento de Aguas Residuales (STAR) para mejorar el vertimiento a fuentes hídricas naturales. Para ello, se han generado normas que regulan dichos sistemas y vertimientos, las cuales no han sido implementadas de manera rigurosa, ya que se ha evidenciado el bajo tratamiento de aguas residuales en las principales ciudades del país. Teniendo en cuenta esta realidad, surgió la pregunta de cuáles son los factores que han limitado la implementación de STAR en el país. Para ello se realizó la presente investigación desde un enfoque de componentes legales, económicos y técnicos. Se encontraron deficiencias en las normas establecidas para los vertimientos. Se evidenció una disposición de recursos económicos para la implementación de dichos sistemas; no obstante, también se evidenciaron fallas en los sistemas seleccionados y su baja eficiencia. Para verificar la eficiencia del tratamiento de aguas residuales, se relaciona información del incremento poblacional con las cargas contaminantes vertidas, con lo cual se encontró que el sector industrial ha aumentado su aporte en dichas cargas. Es claro que pese el aumento gradual de los rubros destinados al mejoramiento del agua potable y saneamiento básico, año tras año se incrementa el volumen de carga vertida. Se concluye que los factores que limitan la correcta implementación de STAR son principalmente de tipo técnico, pues los sistemas seleccionados no son mejores con relación al costo beneficio.

PALABRAS CLAVE

STAR, cargas contaminantes, vertimiento, remoción, presupuesto APSB.

ABSTRACT

Given the importance of water resources in Colombia, different Wastewater Treatment Systems (STAR) have been implemented to improve discharge to natural water sources. For this, norms have been generated that regulate said systems and discharges, which have not been rigorously implemented, since there has been evidence of low wastewater treatment in the main cities of the country. Taking this reality into account, the question arose as to what are the factors that have limited the implementation of STAR in the country. For this, the present investigation was carried out from a legal, economic and technical components approach. Deficiencies were found in the standards established for discharges. There was evidence of a provision of economic resources for the implementation of said systems; however, failures in the selected systems and their low efficiency were also evidenced. To verify the efficiency of wastewater treatment, information on the population increase is related to the polluting loads discharged, with which it was found that the industrial sector has increased its contribution to said loads. It is clear that despite the gradual increase in the items destined to improve drinking water and basic sanitation, year after year the volume of discharged cargo increases. It is concluded that the factors that limit

the correct implementation of STAR are mainly technical, since the selected systems are not better in relation to cost benefit.

KEYWORDS

STAR, polluting loads, dumping, removal, APSB budget.

INTRODUCCIÓN

Desde hace aproximadamente 50 años Colombia ha legislado la gestión ambiental con la creación de leyes como el Código de Recursos Naturales (Ley 23 de 1973) y la creación del Sistema Nacional Ambiental SINA (la Ley 99 de 1993) y los decretos 2811 de 1974 (Código Nacional de Recursos Naturales Renovables y de Protección al Medio Ambiente) y el Decreto 3930 de 2010. En ellos se hace referencia a la conservación y preservación de las aguas, además de su tratamiento previo al vertimiento. Lamentablemente, dichas leyes no han sido implementadas de una manera rigurosa. Por ejemplo, la Superintendencia de Servicios Públicos Domiciliarios en 2006 reportó que los sistemas de tratamiento utilizados por las empresas proveedoras de servicios de aguas residuales en las grandes ciudades (Bogotá, Medellín, Cali), trataron sólo el 32% de las aguas residuales vertidas en cuerpos de agua. Además, ciudades con poblaciones relativamente grandes como Cartagena, Cúcuta, Manizales, Pereira, Neiva, Pasto, Tunja, entre otras, no hacen ningún tratamiento a sus aguas residuales. El retraso del país en el tema de tratamiento de aguas residuales es debido a la baja capacidad de los sistemas en funcionamiento y a la inexistencia de tratamiento en gran parte del país. (IANAS y UNESCO, 2015). Componentes legales, económicos y técnicos constituyen casi la totalidad de la problemática ambiental ligada al manejo de aguas residuales en Colombia.

La baja capacidad de tratamiento de aguas residuales se aprecia mejor al considerar lo siguiente: a los cuerpos de agua de Colombia tan solo se devuelven anualmente 36% de las aguas residuales tratadas (Pochat et. al 2018), cifra por debajo de la media para América Latina 47,7% ubicando a Colombia por debajo de países como Uruguay 72%, Brasil 86% y Chile 97% (Ibidem). Capitales departamentales, como Barranquilla, únicamente disponen de lagunas de oxidación previo vertimiento de las aguas residuales. Bogotá, pese a contar con la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR) Salitre, sólo trata el 25% de sus aguas residuales (Beleño, 2011).

Para el año 2002, El Ministerio del Medio Ambiente reportó en su inventario de STAR que sólo el 22% de las cabeceras municipales trataban sus aguas residuales, llevando a la contaminación de cerca de 1300 cuerpos de agua por vertimiento de aguas crudas (Ministerio del Medio Ambiente, 2002). La Superintendencia de Servicios Públicos Domiciliarios, conociendo la necesidad de contar con un inventario de STAR con datos actuales tales como cantidad, tipo de tecnología, unidades de

tratamiento, caudales de diseño y operación (SSPD, 2017); está desarrollando el inventario nacional de infraestructura de STAR por medio del Sistema Único de Información (SUI) (SSPD, 2018). Sin embargo, no todos los prestadores del servicio reportan sus datos al SUI, de allí que el inventario tenga un amplio rango de mejora (Ibidem).

En 2016, de los 1102 municipios de Colombia, 541 contaban con 696 STAR, una media departamental de 22 STAR (SSPD, 2017). A 2018 se registraban 682 STAR, 14 menos que en 2016 (SSPD, 2018). El número STAR por departamento presenta una distribución variable: Cundinamarca 123, Antioquia 92, Boyacá 37, en contraposición a departamentos como: Risaralda 1, Amazonas 0 y Guaviare 0, situando cerca del 50% de los STAR en 4 de los 32 departamentos de Colombia (Ibidem).

Teniendo en cuenta que Colombia está catalogado como uno de los países con mayor oferta hídrica del planeta (IANAS y UNESCO, 2015) y los datos anteriormente expuestos, se evidencia que los bajos niveles de tratamiento de aguas residuales en Colombia implican un problema que necesita más atención en pro del buen uso y la preservación de los recursos hídricos. Cabe resaltar que Colombia en 1964 registró un 52,01% de población urbana, valor que para el 2016 fue del 77% (Pochat et. al 2018). Representando esto un reto respecto a la gestión de las aguas residuales de las principales ciudades del país.

A continuación, se busca analizar información relacionada con aspectos legales, técnicos y económicos, consultada en diferentes fuentes oficiales. Lo anterior con el fin de identificar los principales factores que han limitado una correcta implementación o bien un funcionamiento eficiente de los diferentes STAR del país.

Estado del arte

Castro (2018) encontró que existen ciertas inconsistencias normativas en cuanto a la disposición de los lodos generados por tratamiento de aguas residuales. Al respecto, el decreto 1287 de 2014, que establece el uso de biosólidos generados en PTAR, y el decreto 0330 de 2017, que adopta el Reglamento Técnico para el Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico RAS, no son claros en cuanto a la disposición de lodos residuales industriales y peligrosos. Lo anterior dado que en esos dos decretos la disposición de lodos residuales de PTAR industriales no está definida, además que no indican el manejo respectivo de lodos residuales peligrosos. Por otra parte, la norma admite que los biosólidos contengan remanentes de plomo y que sean usados en la operación de rellenos sanitarios. Con relación a lo anterior, Castro (2018) afirma que las Corporaciones Autónomas Regionales CAR no exigen el cumplimiento de los parámetros de vertimientos a las pequeñas y grandes industrias que usan sustancias contaminantes. Así mismo, no se tiene un seguimiento de

dichos vertimientos generados por los municipios, ni de la generación, manejo y disposición de los lodos residuales. Esta situación lleva a una baja exigencia en cuanto a la calidad del agua vertida a las fuentes hídricas y por ende a la baja implementación de STAR funcionales.

Por su parte Donado (2013) también hace referencia al incumplimiento de las de las normas de vertimiento de aguas residuales a fuentes hídricas, falta de mantenimiento a la infraestructura, desconocimiento de protocolos de operación e incumplimiento de los Permisos de Vertimientos establecidos en los Planes de Manejo de Saneamiento y Manejo de Vertimientos, esto basado en la inspección realizada por la superintendencia de servicios públicos en los años 2011 y 2012 a 333 sistemas de tratamiento de 562 instalados en diferentes municipios del país, en donde se reportaron además del incumplimiento de las normas, plantas fuera de operación.

El Ministerio del Medio Ambiente identificó algunos factores que no permiten una adecuada gestión, tratamiento y disposición final de aguas residuales. Uno de ellos hace referencia al alto costo que representan los STAR centralizados, limitando la posibilidad de disponer de recursos municipales para proyectos de descontaminación hídrica (Ministerio del Medio Ambiente, 2002). Maca (2014), al analizar la viabilidad económica para la implementación de un STAR en la ciudad de Guadalajara de Buga, encontró que un sistema descentralizado puede ser igual de eficiente y económicamente más viable, disminuyendo la inversión inicial necesaria para infraestructura de saneamiento hídrico en Guadalajara de Buga y en municipios similares.

El Ministerio del Medio Ambiente (2002) expuso que no existen suficientes estudios que permitan tener claridad respecto a qué tipo de tecnologías de STAR tienen una relación entre eficiencia y costo que permitan una mayor implementación. ACODAL (1999) analizó la importancia del equilibrio costo/beneficio en la sostenibilidad de un STAR en el tiempo, tanto a nivel micro (capacidad de pago de usuarios), como a nivel macro (desarrollo sostenible en la región). Se encontró que el tratamiento de lodos activados no es económico, pero si altamente efectivo, hasta un 90% en términos de remoción, siendo menos efectivos tratamientos primarios de sedimentación hasta 40% o tratamientos biológicos anaerobios U.A.S.B con hasta 70%; aunque menos costosos (Ibidem).

Un análisis de los costos de inversión inicial, operación y mantenimiento de STAR, enfocado a pequeñas comunidades en Colombia (Patiño, 2012), encontró que los costos de operación y mantenimiento proyectados a 20 años presentan similitud para todos los STAR; por el contrario, los costos de la inversión inicial cuentan con diferencias considerables. Los costos de menor inversión inicial se atribuyen a sistemas de laguna anaeróbica; éstos, sin embargo, requieren un terreno amplio para su implementación. Los humedales de flujo subsuperficial son los que menos terreno requieren, siendo el terreno una variable de mucha influencia en los costos de inversión

inicial; sus condiciones topográficas, así como las condiciones climáticas, son cruciales al momento de decidir alternativas de tratamiento que permitan disminuir costos de inversión inicial.

La descontaminación de efluentes hídricos influye de manera positiva en la disponibilidad de agua de calidad, de allí es de donde se alimentan las redes de acueducto, siendo estas últimas las que reciben mayor inversión frente a los STAR (Minambiente, 2002). El 97% de las zonas urbanas en Colombia cuentan con acueductos, frente al 73% para acueductos en zonas rurales (CONPES, 2014). Estas cifras contrastan mucho con el 36% de las aguas residuales que reciben algún tipo de tratamiento (Pochat et. al 2018). El presupuesto dirigido al tratamiento de aguas residuales es cercano al 1% del presupuesto destinado a agua potable (Rodríguez et. al, 2016).

Otro factor principal que afecta el saneamiento hídrico en Colombia es la falta de planes maestros de alcantarillado y saneamiento urbano (Minambiente, 2002). Con el fin de garantizar la sustentabilidad hídrica, en 2004 La Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá EAAB presentó los lineamientos conceptuales, técnicos, jurídicos y de política que componen el plan maestro de acueductos y alcantarillados en pro de estructurar y articular los sistemas urbanos y rurales regionales (EAAB, 2006). Más recientemente el Plan Director de agua y saneamiento básico (Minvivienda, 2018), estructuró una propuesta para el desarrollo de estrategias a corto, mediano y largo plazo, por medio de la cual se contribuya a garantizar la seguridad hídrica del país.

El Estudio Nacional del Agua de 2018 (ENA, 2018), presenta un análisis de la carga contaminante vertida desde el sector doméstico e industrial, basados en la información existente de las PTAR para 352 municipios registradas al año 2016. Dicho estudio mostró un caudal de agua tratado por las PTAR de $26,6 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$, y un caudal vertido estimado de $62,9 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$, con un total de aguas residuales tratadas en términos de caudal de 42,2%. Cabe aclarar que, dadas las limitaciones en la obtención de la información, los datos reportados son indicativos y no datos con exactitud del estado del tratamiento de las aguas residuales (ENA, 2018).

Los recursos destinados para STAR se encuentran dentro del presupuesto correspondiente para Agua Potable y Saneamiento Básico (APSB) (Minvivienda, 2018). Estos recursos provienen de cuatro fuentes, Sistema General de Participaciones (SGP), Sistema General de regalías (SGR), Tarifas y Presupuesto General de Nación (PGN), Según cálculos del Ministerio de Vivienda Ciudad y Territorio (MVCT) se emplearon entre el año 2012 al 2017 un 7.9% del SGP para tratamiento, valor que dista en buena medida al 15% calculado por el grupo de monitoreo de SGP-APSB (Ibidem).

Dado que son escasos los estudios relacionados con información cuantificable de STAR respecto a su cantidad, estado, tipo de tratamiento, costos de funcionamiento y mantenimiento, etc. Y teniendo en cuenta que los análisis existentes no son del todo concluyentes, este documento busca aportar un punto de vista actual, por medio del cual sea posible identificar las principales falencias en los STAR del país.

METODOLOGÍA

Vertimientos

Partiendo de la necesidad de encontrar los diferentes factores objetivo de la investigación, se realizó una revisión bibliográfica. Se buscó recopilar toda información existente relacionada, de diversos tipos de fuentes (artículos científicos, publicaciones institucionales, libros, trabajos académicos y material archivado), lo anterior con el fin de establecer una relación y poder cotejar datos que lleven a un análisis crítico que permitan dar respuesta al problema planteado.

El ENA, en sus reportes de los años 2010, 2014 y 2018 presenta información detallada de las cargas contaminantes generadas, vertidas y removidas del sector doméstico e industrial para los parámetros de Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO), Demanda Química de Oxígeno (DQO), Sólidos Suspendidos Totales (SST), Nitrógeno Total (NT), y Fósforo Total (PT). Esta información fue recopilada y clasificada. Dado que el reporte de 2010 sólo cuenta con información de cargas vertidas, se usaron los datos de los años 2012 y 2016 presentados en los reportes de 2014 y 2018. Con ellos se hizo la comparación de la carga vertida para cada periodo y se calculó el porcentaje de incremento de dichas cargas para su posterior análisis.

Basados en los datos anteriormente mencionados se tomaron los valores de las cargas para hallar el incremento de estas entre el año 2012 y 2016, hallando variaciones positivas para los diferentes parámetros.

Teniendo en cuenta que uno de los factores que puede influir en la variación de las cargas generadas y vertidas es el aumento de la población, se analizaron los datos poblacionales de los años 2012 y 2016, tomando dicha información del Departamento Administrativo Nacional de Estadística DANE.

Con el fin de correlacionar la carga vertida con los sectores doméstico e industrial, se calculó el aumento de cargas contaminantes vertidas para los sectores doméstico e industria, tomando los aportes de estos en cada parámetro registrados para los años 2012 y 2016. (Tabla 6)

Con los valores de población suministrados por el DANE para los años 2012 y 2016 se calculó el PIB real para la rama industria. Partiendo de valores de PIB corrientes desestacionalizados, se aplicó un valor deflactor al PIB de 2016, para así conocer su valor real. (Tabla 5)

Presupuesto APSB

Se tomaron datos de las inversiones globales en APSB entre 1999 y 2017 del Plan Director de Agua y Saneamiento Básico (Minvivienda, 2018). Los datos de las inversiones disgregadas por rubros fueron extraídos de los informes anuales de distribución de los recursos, en la página web del Departamento Nacional de Planeación DNP (DNP, 2020).

Eficiencia Vs. Costos

A partir de diferentes publicaciones (Tabla 1), se compilaron valores de eficiencia en porcentaje de remoción para nueve tipos diferentes de STAR, para SST y DBO. Además, se compilaron datos relacionados con valores de inversión (US\$/Hab) y mantenimiento (US\$ año/Hab). Dado que el tiempo de vida útil para una PTAR se estima entre 10 y 30 años, los valores de mantenimiento de cada uno de los STAR se proyectaron a 20 años con el fin de hacer un análisis más amplio.

Los porcentajes encontrados de eficiencia de remoción de SST y DBO y los valores de inversión y mantenimiento, se encontraron en su mayoría en rangos. Con los rangos de cada referencia, se calculó un valor promedio para cada STAR.

RESULTADOS

Vertimientos

La Tabla 1 presenta el compilado de datos relacionados con las cargas contaminantes generadas, vertidas y removidas en los sectores doméstico e industrial, presentados en los ENA 2014 y 2018.

Tabla 1. Carga contaminante generada y vertida por los sectores doméstico e industrial, y carga removida en STAR para 2012 y 2016.

Parámetro	Carga generada (10 ⁶ t/año)		Carga vertida (10 ⁶ t/año)		Cantidad removida (10 ⁶ t/año)		Remoción (%)	
	2012	2016	2012	2016	2012	2016	2012	2016
DBO	1,1	2,0	0,7	1,1	0,3	0,8	32,1	41,9
DQO	2,4	5,2	1,6	2,8	0,8	2,4	31,6	45,5
SST	1,5	2,0	1,1	1,3	0,4	0,7	26,3	33,4
NT	0,1	0,2	0,1	0,1	0,003	0,01	2,0	5,9
PT	0,03	0,04	0,03	0,03	0,001	0,002	1,7	6,1
Total	5,2	9,3	3,7	5,4	1,5	3,8	29,2	41,4

Fuente: ENA (2014 y 2018). *DBO (Demanda Bioquímica de Oxígeno), DQO (Demanda Química de Oxígeno), SST (Sólidos Suspendidos Totales), NT (Nitrógeno Total), PT (Fósforo Total).

Presupuesto APSB

Tabla 2. Fuentes de presupuesto anual para APSB (1999-2017).

Año	APSB (Billones)					
	SGP	SGR	PGN	Tarifas	Año	Periodo
1999	0,85	0,46	0,09	0,28	1,67	6,80
2000	0,81	0,41	0,09	0,31	1,62	
2001	0,91	0,41	0,12	0,32	1,76	
2002	0,96	0,40	0,11	0,29	1,76	
2003	0,87	0,57	0,25	0,60	2,30	9,50
2004	0,88	0,59	0,25	0,66	2,38	
2005	0,89	0,58	0,24	0,67	2,38	
2006	0,87	0,63	0,21	0,74	2,44	
2007	0,83	0,51	0,19	0,59	2,12	10,30
2008	0,85	0,48	0,20	0,57	2,10	
2009	0,83	0,43	0,19	0,56	2,00	
2010	0,85	0,42	0,22	0,54	2,02	
2011	0,98	0,32	0,24	0,52	2,06	
2012	1,32	0,35	0,70	0,42	2,79	16,91
2013	1,41	0,42	0,78	0,39	3,00	
2014	1,47	0,38	0,36	0,45	2,66	
2015	1,55	0,42	0,20	0,47	2,64	
2016	1,68	0,25	0,36	0,48	2,76	
2017	1,88	0,29	0,40	0,49	3,06	

Fuente: Minvivienda (2018), Plan director de agua y saneamiento básico. informes anuales de distribución de los recursos DNP. Elaboración propia.

Eficiencia Vs. Costos

Tabla 3. Eficiencia de SST y DBO frente a sus valores de inversión y mantenimiento.

STAR		Reducción (%)				Inversión		Mantenimiento			Ref.
		SST		DBO		US\$ Hab		US\$ Año/Hab		20 años	
#	Tipo	Rango	Media	Rango	Media	Rango	Media	Rango	Media	20 años	
1	Lodo activado tradicional	80-90		80-95		-		-			a
		85-98		70-98		-		-			b
		55-95		55-95		-		-			c
		80-90		85-93		-		-			d
		80-90	83	80-90	83	80-100	72	4-5	5	90	e
		-		-		61		-			f
		55-95		55-95		-		-			g
		-		-		40-120		-			h
		-		80-90		-		-			i
2	Lagunas tradicionales	80-90		63-75		-		-			a
		90-95	87	85-95	82	-	25	-	0,3	6	c

		75-95		90-95		-		-			b
		70-90		70-90		20-40		0,2-0,4			e
		85-95		85-95		-		-			g
		-		-		10-30		-			h
		-		70		-		-			i
3	Reactores UASB	60-80		60-70		-		-			j
		72		83		-		-			k
		60-70	69	65-80	72	-		-			a
		70-80		60-80		20-40	30	1-1,5	1	25	e
		-		-		20-40		-			h
		-		70		-		-			i
4	Filtro anaerobio	70-80	75	70-80	75	15-25	20	0,8-1	1	18	e
5	Tratamiento primario avanzado	70-90		50-85		-		-			b
		73-84		46-70		-		-			l
		70-85		45-55		30-50		2-4			e
		87-93	81	80-90	61	-	33	-	3	60	m
		70-90		50-85		-		-			g
		-		-		20-30		-			h
		-		40		-		-			i
6	Humedales	80-90	85	80-90	85	30-60	45	2-4	3	60	e
7	UASB - filtro anaerobio	80-95	88	90-95	93	5-30	18	1-1,5	1	25	e
8	UASB + Lodo activado	85-95	90	85-95	89	-	38	-	4	75	n
		87-93		83-93		30-45		2,5-5			e
9	UASB + Filtro percolador alta tasa	87-93	90	80-93	87	25-35	30	2-3	3	50	e

Fuentes: a. (RAS, 2000), b. (Yañez, 1995), c. (Fair, 1954), d. (Von Sperling, 1996), e. (Torres, 2012), f. (Rodriguez et al., 2015), g. (Rojas, 2002), h. (Salas, 2007), i. (Rojas, 2011), j. (Torres, 2000), k. (Valencia, 2002), l. (Tsukamoto, 2002), m. (Caicedo, 2005), n. Van Haandel-Lettinga). Elaboración propia.

ANÁLISIS DE RESULTADOS

Vertimientos

En la Tabla 4 se analizan los incrementos en los valores entre 2012 y 2016 de las diferentes cargas contaminantes presentadas en la Tabla 1, Se observa que los valores de los 3 parámetros analizados aumentaron considerablemente, presentando un incremento en la carga generada de 79,6 %, en la carga vertida de 48,8% y en la carga removida de 154,0% con un porcentaje de remoción de solo el 12,1%.

Cabe resaltar que los documentos ENA estudiados presentan limitaciones en la información de las estaciones de monitoreo existentes, debido a la baja cobertura y a las variaciones significativas que existen entre vertimientos normalizados de fuentes similares. Por esta razón los valores proporcionados son indicativos de lo que ocurre en la corriente donde se encuentra la estación de monitoreo.

Tabla 4. Incremento de cargas (2012 - 2016).

Parámetro	Incremento						% de remoción
	Carga generada		Carga vertida		Carga removida		
	(10 ⁶ t/año)	(%)	(10 ⁶ t/año)	(%)	(10 ⁶ t/año)	(%)	
DBO	0,9	80,0	0,4	54,0	0,5	134,7	9,8

DQO	2,8	114,8	1,2	71,2	1,6	208,8	13,9
SST	0,5	29,9	0,2	17,4	0,3	65,1	7,1
NT	0,03	19,5	0,2	14,8	0,01	254,3	3,9
PT	0,003	8,8	0,001	3,9	0,002	292,8	4,4
Promedio		79,6		48,8		154,0	12,1

Fuente: ENA (2014 y 2018). Elaboración propia.

Para los años 2012 y 2016 el DANE estimó una población de 46`581.823 y 48`747.708, respectivamente, a nivel nacional (Fuente: Departamento Administrativo Nacional de Estadística: www.dane.gov.co); es decir un incremento del 4,6% en la población (Tabla 5). Para ese periodo, por lo tanto, el aumento poblacional es bajo en comparación con el incremento del 79,6% de la carga generada. Estos resultados indicarían que el aumento en la carga generada está sólo en una pequeña proporción vinculado con el aumento de la población; es decir, el sector doméstico no representa un factor significativo en incremento de la carga generada.

Tabla 5. Incremento poblacional 2012 - 2016.

Censo	Habitantes	%
2016	48.747.708,0	4,6
2012	46.581.823,0	

Fuente: DANE. Elaboración propia.

El sector industria ha aportado al incremento de las cargas generadas. El Producto Interno Bruto (PIB) nominal en la rama industrial, para los años 2012 y 2016 fue de COP\$664,5 y COP\$862,7 billones, respectivamente (DANE, 2016), representado un aumento nominal de 29,8%, y un aumento real de 16,1 %. Estos resultados implican un fuerte incremento de actividad industrial que estaría ligada en mayor proporción al aumento de los diferentes parámetros de cargas del análisis. (Tabla 6).

Tabla 6. Aumento de PIB entre 2012 (nominal) y 2016 (real).

Año	PIB Nominal (Billones)	Deflactor PIB	PIB Real (Billones)	Aumento del PIB entre 2012 (nominal) y 2016 (Real)
2012	664,5	100,0	664,5	16,1
2016	862,7	111,8	771,6	

Fuente: DANE (2012 y 2016). Elaboración propia.

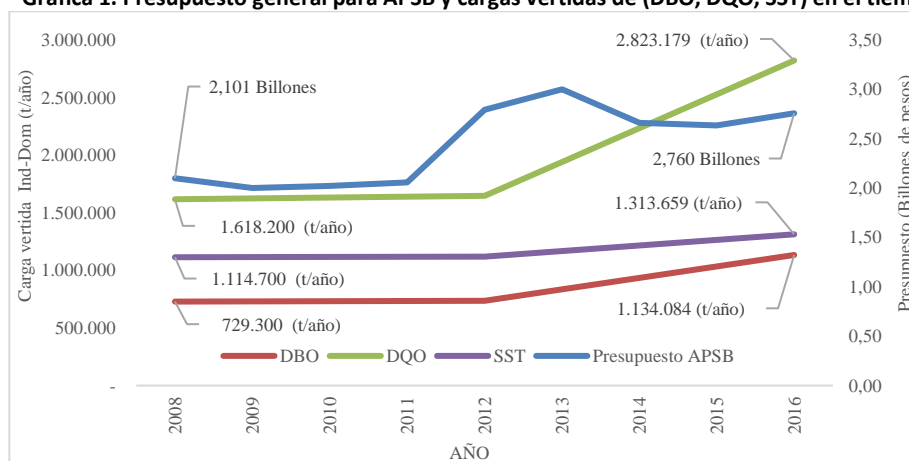
En cuanto a la carga vertida, ésta presentó un aumento del 48,8% en promedio entre 2012 y 2016 (Tabla 4). Según la información suministrada por los ENA (Tabla 7), para los años 2012 y 2016 el sector doméstico aportó en promedio 72,8% y 48,0% del total de las cargas vertidas, respectivamente. Para los mismos años, el sector industrial aportó en promedio 25,0% y 48,6%, respectivamente (Tabla 7). Es claro que el sector industrial aumenta su aporte de manera significativa a las cargas vertidas, especialmente en el vertimiento de Nitrógeno Total (NT), mientras que el sector doméstico presenta una disminución en las cargas vertidas. Los anteriores resultados indicarían malas prácticas en la producción industrial o incumplimiento de la norma de vertimientos por parte del sector industrial.

Tabla 7. Aporte cargas vertidas sectores industrial y doméstico para los años 2012 y 2016.

Parámetro	2012				2016				Incremento	
	Ind		Dom		Ind		Dom			
	(10 ⁶ t/año)	(%)	(10 ⁶ t/año)	(%)	(10 ⁶ t/año)	(%)	(10 ⁶ t/año)	(%)	Ind (%)	Dom (%)
DBO	0,2	28,0	0,5	69,0	0,6	51,0	0,5	45,0	180,5	0,5
DQO	0,6	37,0	1,0	61,0	1,8	62,0	1,0	35,0	187,0	-1,7
SST	0,1	7,0	1,0	91,0	0,2	16,0	1,1	80,0	168,3	3,2
NT	0,02	16,0	0,1	84,0	0,1	74,0	0,04	26,0	430,7	-64,5
PT	0,002	7,0	0,03	92,0	0,003	9,0	0,03	91,0	33,6	2,8
Total	0,9	25,0	2,7	72,8	2,6	48,6	2,6	48,0	190,9	-1,2

Fuente: ENA (2014 y 2018). Elaboración propia.

Gráfica 1. Presupuesto general para APSB y cargas vertidas de (DBO, DQO, SST) en el tiempo.



Elaboración propia.

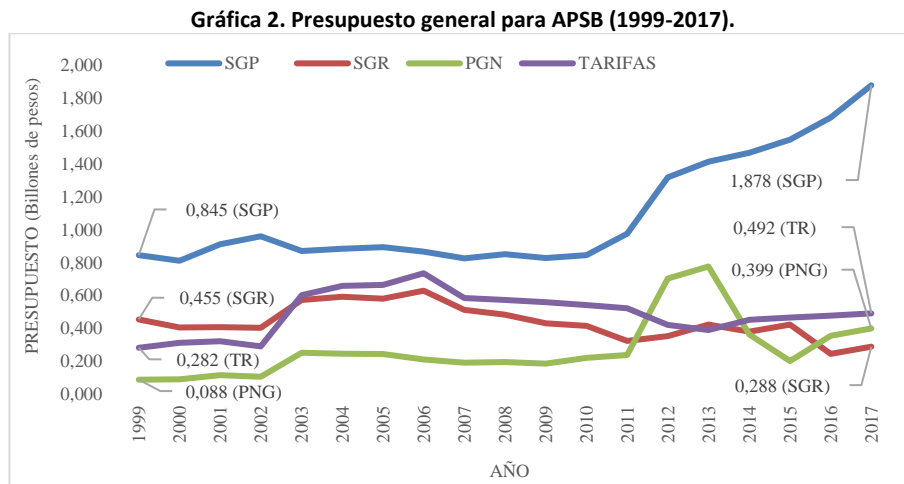
En el periodo 2011 al 2015 hubo un aumento del presupuesto APSB de 29,3 % con relación a los años anteriores como se presenta en la Gráfica 1, esto podría explicar el incremento del 154% de la carga removida promedio entre 2012 y 2016 (Tabla 4). Sin embargo, se observa que las cargas vertidas de los parámetros DBO, DQO y SST entre los años 2008 y 2012 se mantienen constantes; a partir del año 2012 las cargas se incrementan de forma importante, siendo la DBO y la DQO las que presentan un incremento más significativo, coincidiendo con el incremento en las cargas vertidas de dichos parámetros para el año 2016 (tabla 7), evidenciando posibles fallas en los STAR implementados principalmente por el sector industrial para el vertimiento a las fuentes hídricas.

Aunque se evidencia un aumento del presupuesto asignado para los STAR y una mejora en las cargas removidas, la información obtenida acerca de las cargas vertidas por el sector industria es alarmante ya que esto demuestra una falta de control por parte de los entes reguladores, y por otra parte que los sistemas utilizados no tienen la eficiencia y la capacidad para el tratamiento de aguas residuales generadas por los sectores industrial y doméstico, es decir, a pesar de que hay

un aumento en la inversión para los STARS, este no se ve reflejado en la disminución de la cargas vertida, demostrando un incremento en la generación de aguas residuales y a su vez un deterioro ambiental. Por lo anterior se puede ver un desarrollo lento en el tratamiento de aguas residuales en Colombia, puesto que no se están implementando sistemas de tratamiento eficientes en función del desarrollo de la industria y al aumento de carga vertida que esto implica.

Presupuesto APSB

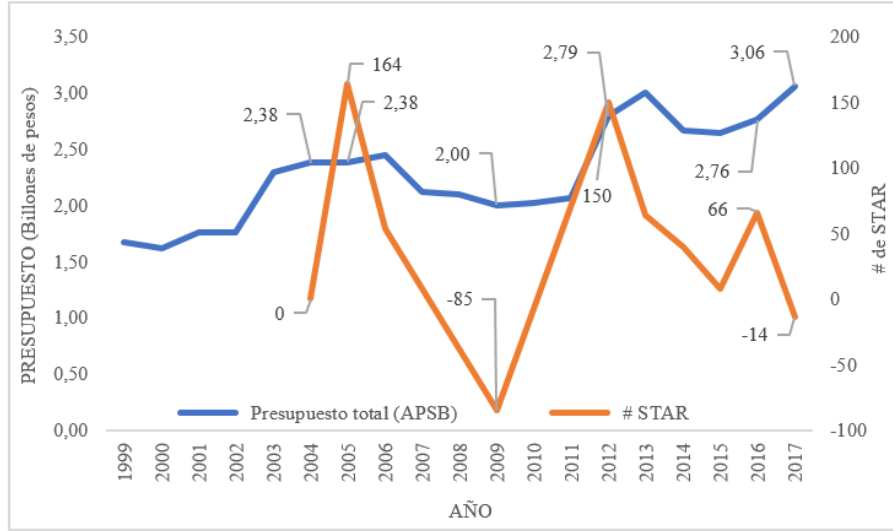
El SGP entregó aproximadamente COP\$20,7 billones, entre 1999 y 2017, equivalente al 47,0% del presupuesto total de APSB. A partir del 2012, el presupuesto proveniente del SGP superó COP\$1,3 billones anuales, lo que se vio reflejado en el periodo de inversión más alto para el presupuesto de SGP, COP\$9,3 billones de pesos entre (2012-2017) (Gráfica 2).



Fuente: Minvivienda (2018), Plan director de agua y saneamiento básico. informes anuales de distribución de los recursos (DNP, 2020). Elaboración propia.

El presupuesto proveniente del SGR para el año 2006 alcanzó los COP\$0,63 billones, en 2017 disminuyó hasta los COP\$0,28 billones, un 55,5% menos. El presupuesto correspondiente al PNG alcanzó los COP\$0,77 billones en 2013, un 49,3% menos, al disminuir hasta los COP\$0,39 billones. El presupuesto proveniente de las tarifas alcanzó su máximo en 2006 con COP\$0,73 billones, en 2017 aportó COP\$0,49 billones para 2017, un 36,3% menos.

Gráfica 3. Presupuesto general para APSB (1999-2017) y variación anual STAR en el tiempo.

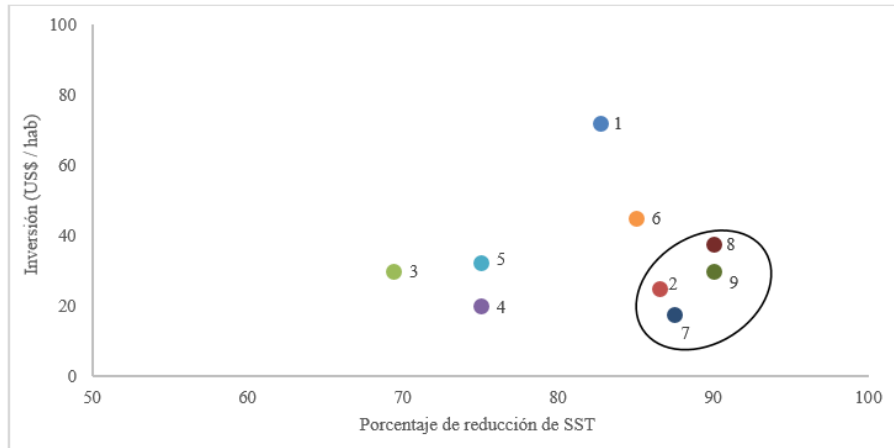


Elaboración propia.

El presupuesto global para APSB (Gráfica 3), pasó de COP\$2,00 billones en 2009 a COP\$3,06 billones en 2017, un aumento de 53,0% en 7 años. Si bien el número de STAR pasó de 369 en el año 2009 a 682 en el año 2017, un aumento de 84,8%, Es claro que pese al aumento gradual de inversión entre 2012 y 2017 la cantidad de STAR no aumenta en concordancia, incluso en algunos años el número total de STAR disminuyó, entre 2006 y 2009 se registraron 85 STAR menos y entre 2016 y 2017 14 STAR menos.

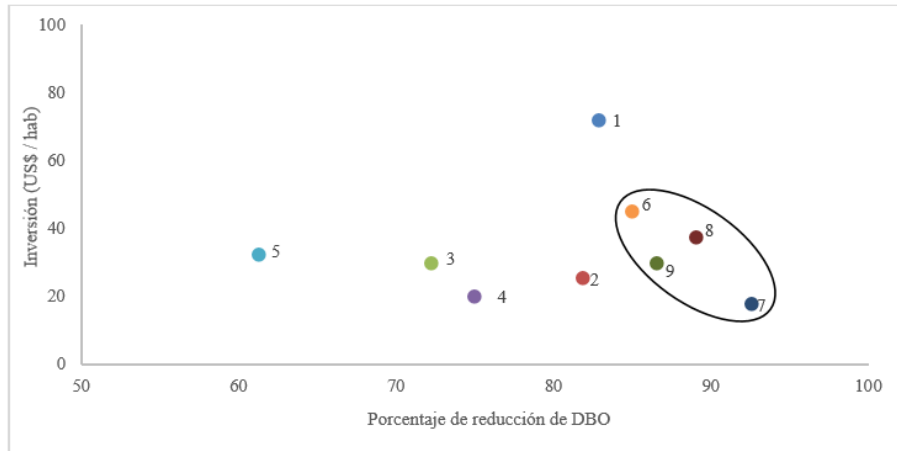
Eficiencia Vs. Costos

Gráfica 4. Eficiencia en reducción de SST vs costos de inversión (US\$/Hab).



Elaboración propia.

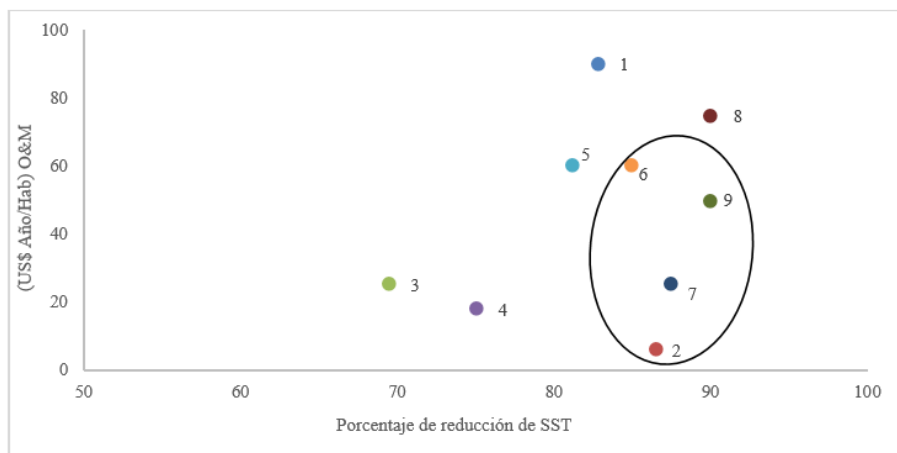
Gráfica 5. Eficiencia en reducción de DBO vs costos de inversión (US\$/Hab).



Elaboración propia.

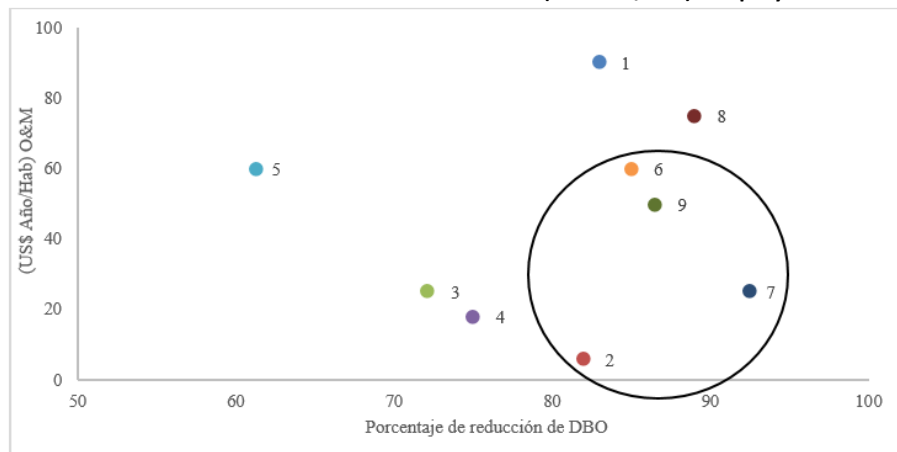
Al graficar los porcentajes de eficiencia en reducción de SST vs costos de inversión, se observa que los valores agrupados en la parte inferior derecha corresponden a los de un menor costo de inversión y un alto porcentaje de eficiencia 2, 7, 8, 9 (Gráfica 4). En cuanto a los porcentajes de eficiencia en reducción de DBO vs costos de inversión, los que se consideran más eficientes y económicos son 6, 7, 8, 9 (Gráfica 5).

Gráfica 6. Eficiencia Para SST Vs Costo de mantenimiento (US\$ Año/Hab) con proyección a 20 años.



Elaboración propia.

Gráfica 7. Eficiencia Para DBO Vs Costo de mantenimiento (US\$ Año/Hab) con proyección a 20 años.



Elaboración propia.

Respecto a los porcentajes de eficiencia en reducción de SST vs costos de mantenimiento, como para eficiencia en reducción de DBO vs costos de mantenimiento (Gráfica 6 y 7), se observa el mismo resultado para los STAR 2, 6, 7, 9. Siendo un factor común en todas las gráficas los STAR 7 (UASB + Filtro anaerobio) y 9 (UASB + Filtro percolador de alta tasa). Seguidos de los STAR 2 (Lagunas tradicionales) y 6 (Humedales).

El tratamiento por medio de lodos activados es el más usado en Colombia (Morgan, 2013), tanto en centros poblados como en cascos urbanos. Los STAR más similares entre los analizados corresponden al número 1 (Lodos activado tradicional), y al 8 (UASB + Lodos activados). Se caracterizan por tener porcentajes de reducción de SST y DBO altos, en promedio 86 %. Los costos de inversión, operación y mantenimiento promedio son US\$38/Hab y US\$75/Hab (20 años), respectivamente, siendo los STAR más caros en cuanto a costos de operación mantenimiento y ubicándose entre los tres más caros en cuanto costos de inversión (Tabla 3), lo que podría suponer poca practicidad en su utilización.

La PTAR San Fernando en Medellín, empezó su funcionamiento a finales del año 2000 con una inversión de US\$130 millones (CM, 2017). Recibiendo caudales de Envigado, Itagüí, Sabaneta, La estrella y parte del sur de Medellín, poblaciones que para la época sumaban aproximadamente 950.000 habitantes. Dando un costo de inversión aproximado de US\$137/Hab (Tabla 8), más de 3 veces el valor medio extraído de las diferentes fuentes US\$38/Hab (Tabla 3). El tratamiento se hace por medio de lodos activados con tratamiento de lodos mediante digestión anaerobia y deshidratación de biosólidos.137

La PTAR Aguas Claras ubicada en el municipio de Bello en Antioquia, tuvo una inversión aproximada de US\$450 millones (CM, 2017). Fue diseñada con porcentajes de eficiencia objetivo del 80% en reducción de SST y DBO (Ibidem), tratando caudales de 2'200.000 habitantes entre Medellín y Bello. En este caso el costo de inversión aproximado fue de US\$203/Hab, más de 5 veces el valor medio antes mencionado.

Tabla 8. Costos de inversión en US\$ Hab para diferentes PTAR en Colombia.

PTAR	Inversión 10 ⁶ COP\$	Habitantes	COP\$ Hab	US\$ Hab
Bojacá	\$ 9.977	12.000	\$ 831.417	\$ 238
Sopó	\$ 20.254	26.769	\$ 756.637	\$ 216
Bello (Aguas Claras)	\$ 1.560.000	2.200.000	\$ 709.091	\$ 203
Villa pinzón	\$ 12.941	19.742	\$ 655.511	\$ 187
Fúquene	\$ 3.357	5.617	\$ 597.666	\$ 171
Ubaté	\$ 22.581	38.809	\$ 581.850	\$ 166
Zipacón	\$ 3.139	5.570	\$ 563.592	\$ 161
Cucunuba	\$ 3.791	7.479	\$ 506.993	\$ 145
Simijaca	\$ 6.559	13.077	\$ 501.600	\$ 143
Medellín (San Fernando)	\$ 455.000	950.000	\$ 478.947	\$ 137
Lenguazaque	\$ 4.326	10.268	\$ 421.334	\$ 120
Pacho	\$ 11.324	27.179	\$ 416.645	\$ 119
Guachetá	\$ 4.643	11.385	\$ 407.853	\$ 117
Tausa	\$ 3.375	8.801	\$ 383.479	\$ 110
Granada	\$ 3.348	9.253	\$ 361.838	\$ 103
Viotá	\$ 4.050	13.300	\$ 304.511	\$ 87
Sutatausa	\$ 1.350	5.564	\$ 242.631	\$ 69
Carmen de Carupá	\$ 1.849	9.109	\$ 203.041	\$ 58
Pasca	\$ 1.985	12.175	\$ 163.065	\$ 47
Vergara	\$ 1.114	7.677	\$ 145.109	\$ 41
Junín	\$ 1.073	9.610	\$ 111.655	\$ 32
Susa	\$ 1.080	12.302	\$ 87.791	\$ 25
La mesa	\$ 2.070	31.350	\$ 66.029	\$ 19

Elaboración propia. Fuente: Plan Anual Estratégico y de Inversiones (PAEI) 2016.

La PTAR de Funza para el año 2013 presentó costos de operación y mantenimiento aproximados de US\$265.000/año (CRA, 2014), US\$3,7 año/Hab, lo que proyectado a 20 años corresponde a US\$74 año/Hab. Valores de operación y mantenimiento similares al valor promedio del STAR 8 (UASB + Lodo activado) US\$75 año/Hab, también proyectado a 20 años (Tabla 3).

La PTAR Aguas Claras presentó costos de operación y mantenimiento aproximados a los US\$11,64 millones/año (CRA, 2018), US\$5,2 año/Hab, lo que proyectado a 20 años corresponde a US\$106 año/Hab; levemente por encima del costo de operación y mantenimiento promedio del STAR 1 (Lodo actividad tradicional) US\$90 año/Hab (Tabla 3). El valor promedio de costos de operación y mantenimiento entre los STAR analizados en la (Tabla 3) es de US\$45 año/Hab, ubicando los costos de operación y mantenimiento de Funza y Aguas Claras por encima de la media, pero con costos mucho más ajustados que los de inversión.

De la información recolectada para las 23 PTAR, se observa que la PTAR de Aguas Claras es superada en costos de inversión por la PTAR de Bojacá (US\$238/Hab) y por la PTAR de Sopó (US\$216/Hab) (PAEI, 2016). Es necesario observar cómo el volumen poblacional de las PTAR no tiene ninguna relación con su costo de inversión por habitante, esto podría deberse a que cada una usa un STAR diferente.

El 87% de las PTAR del análisis se encuentran por encima del valor medio de inversión del STAR referencia 8 (UASB + Lodos activados) (Tabla 3), alcanzando hasta 6 veces dicho valor (Tabla 8). Es aquí donde se evidencia la falta de una normatividad que obligue a diseñar STAR sobre la experiencia de los diferentes STAR construidos, sin embargo, dicha experiencia no es apreciable si no se puede tener un panorama completo de estos STAR.

CONCLUSIONES

Como resultado de esta investigación se encontró un incremento considerable en la carga generada, vertida y removida, y un porcentaje de remoción muy bajo entre año 2012 y 2016, por lo cual se evaluó el crecimiento poblacional para dicho periodo de tiempo y se evidenció que el aumento no genera afectación en la carga generada, por su parte se encontró un aumento en el PIB en el sector industria, para el periodo en análisis, lo que representa un aumento en la actividad industrial, que se asocia al incremento de la carga generada. En cuanto a la carga vertida se registró un incremento significativo por parte del sector industrial y una disminución de la carga vertida en el sector doméstico, lo que confirma que el sector industrial es el causante en parte del aumento en las cargas.

Con base en los datos analizados se observó un aumento en el presupuesto APSB entre los años 2011 y 2016, lo que explica la mejora en la carga removida, sin embargo, los datos registrados de parámetros como DBO, DQO y SST tienen un comportamiento constante hasta el 2012 y luego aumentan de manera significativa, mostrando un posible mal funcionamiento en los STAR implementados. Con esto podemos concluir el tratamiento de aguas residuales en Colombia muestra un avance lento que desafortunadamente no va de la mano del crecimiento y el desarrollo del país. Si bien se ha avanzado en la implementación de STAR para el mejoramiento de los vertimientos, estos no han tenido la eficiencia necesaria para cumplir con el tratamiento de las cargas generadas por los sectores industrial y doméstico.

Luego de analizar los resultados obtenidos se observa que se han realizado inversiones para la implementación de PTAR, con el aumento de presupuesto de APSB se registró un aumento del total de STAR entre 2002 y 2017, sin embargo, el crecimiento anual de STAR no es constante,

registrando incluso valores negativos que indican la salida de operación de varios STAR en 2009 y 2017. Es difícil estimar cuál sería la cifra que se necesita para abarcar las necesidades de tratamiento de aguas residuales, y aunque en el periodo de tiempo del análisis el presupuesto para APSB aumentó, se considera que la inversión aún es insuficiente, aunque más importante es el uso que se le da al presupuesto correspondiente a APSB.

Teniendo en cuenta que el STAR más utilizado en Colombia son los lodos activados, se llega a la conclusión que, en términos generales no se está usando una metodología de elección de STAR correcta que ofrezca un equilibrio entre costos y eficiencia. Los reactores anaerobios de flujo ascendente UASB deberían ser la base del planteamiento de la mayoría de mayoría de PTAR, lo anterior partiendo de la base en que al combinarse con otros STAR se tiende a aumentar ligeramente los porcentajes de eficiencia en reducción de SST y DBO, y a disminuir de manera importante los costos de inversión, operación y mantenimiento.

Los costos de inversión de extraídos del PAEI para diferentes PTAR, al ser contrastados con las poblaciones a las que pertenecen arrojan resultados muy por encima de la media para más del 80% de los casos. Los costos de inversión son exagerados los de mantenimiento son un poco menores, pero aun así están por encima de la media.

Los datos necesarios para hacer un análisis amplio acerca de los costos de operación y mantenimiento son escasos, no hay fuentes oficiales que suministren información que permita hacer un seguimiento.

En cuanto a el área técnica, se evidencia la falta de proyección poblacional a la hora del diseño, la elección de tipo de tratamiento no fue el adecuado, además no se tienen en cuenta los costos de mantenimiento y operación, por lo cual algunos STAR han dejado de funcionar o trabajan de manera ineficiente, ya que el caudal para el que fueron diseñadas aumentó.

Retomando la pregunta de análisis podemos decir que los factores que impiden la implementación de STAR en Colombia son de carácter técnico y económico.

REFERENCIAS

- ACODAL (1999), *Avances conceptuales para el tratamiento de las aguas residuales domésticas (A.R.D) en el trópico y estudio de casos*, 43 Congreso Nacional de ACODAL, Colombia.

- Beleño, I (2011). *El 50% del agua potable es de mala calidad*. Universidad Nacional, UN periódico ed.141.
- CAR (2017). *Plan de gestión social para el proyecto de ampliación y optimización de la planta de tratamiento de aguas residuales El Salitre*. Corporación autónoma regional, Colombia.
- Castro, M (2018). *La Frágil Normatividad para la Disposición Final de Lodos residuales en Colombia*. Facultad de ingeniería Programa especialización en planeación ambiental y manejo integral de los recursos naturales. Universidad Militar Nueva Granada. Bogotá.
- CM (2017). *Sesión Plenaria Ordinaria, Acta 227. Marzo 18 de 2017*, Consejo de Medellín.
- CONPES (2014), *Política para el suministro de agua potable y saneamiento básico en la zona rural. Documento 3810*, Consejo Nacional de Política Económica y social, Colombia.
- CRA (2014), *Por el cual se decide la solicitud de incorporación del costo de operación de Tratamiento de Aguas Residuales – CTR presentada por la Empresa Municipal de Acueducto, alcantarillado y Aseo de Funza E.S.P. – EMAAF E.S.P.* Comisión de Regulación de Agua Potable y Saneamiento Básico. Marzo de 2014.
- CRA (2017), *Por la cual se resuelve la solicitud presentada por Empresas Públicas de Medellín E.S.P., respecto de la aprobación de la incorporación del Costo de Tratamiento de Aguas Residuales en el Costo Operativo Particular de Alcantarillado CP_{al}, con ocasión de la entrada en operación de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales Aguas Claras*. Comisión de Regulación de Agua Potable y Saneamiento Básico. Enero de 2018.
- DNP (2020), *Inversiones y finanzas públicas*, consultado en agosto de 2019. url: shorturl.at/zNQV5
- Donado, R. (2013). *Plan de gestión para lodos generados en las PTAR-D de los municipios de Cumaral y San Martín de los Llanos en el Departamento del Meta*. (Tesis de maestría). Facultad de estudios ambientales y rurales, Pontificia Universidad Javeriana, Bogotá.
- EAAB (2006), *Plan Maestro de acueducto y alcantarillado de Bogotá*. Documento técnico soporte. Bogotá, Colombia.
- IANAS y UNESCO. Red Interamericana de Academias de Ciencias Oficina de la en Montevideo y Oficina Regional para la Ciencia en América Latina y el Caribe (2015). *Desafíos del Agua Urbana en las Américas. Perspectivas de las Academias de Ciencias*. Pag.175-208.
- Ley 23 de 1973. Por el cual se conceden facultades extraordinarias al presidente de la República para expedir el Código de Recursos Naturales y de Protección al Medio Ambiente y se dictan otras disposiciones. Publicado en el Diario Oficial diciembre 19 de 1973.
- Ley 99 DE 1993. Por la cual se crea el Ministerio del Medio Ambiente, se reordena el Sector Público encargado de la gestión y conservación del medio ambiente y los recursos

naturales renovables, se organiza el Sistema Nacional Ambiental, SINA, y se dictan otras disposiciones. Diario Oficial de Colombia No. 41146 de diciembre 22 de 1993.

- Maca, G (2014), *Evaluación económica de un sistema de tratamiento de aguas residuales en la ciudad de Guadalajara de Buga*. Universidad del Valle.
- Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial. Decreto 3930 de 2010. Por el cual se reglamenta parcialmente el Título I de la Ley 9ª de 1979, así como el Capítulo II del Título VI -Parte III- Libro II del Decreto-ley 2811 de 1974 en cuanto a usos del agua y residuos líquidos y se dictan otras disposiciones. Diario Oficial 47837 de octubre 25 de 2010.
- Ministerio del Medio Ambiente (2002), *Gestión para el manejo, tratamiento y disposición final de las aguas residuales municipales*, Bogotá, Colombia.
- Minvivienda (2018), *Plan director de agua y saneamiento básico – visión estratégica 2018 – 2030*, Ministerio de Vivienda, Bogotá, Colombia.
- Ojeda & Arias (2000). *Informe nacional sobre la gestión del agua en Colombia, recursos hídricos, agua potable y saneamiento*. Cepal.
- Patiño, J (2012), *Costos de inversión inicial, operación y mantenimiento de tratamientos naturales de aguas residuales para pequeñas comunidades en Colombia*. Pontificia Universidad Javeriana, Bogotá, Colombia.
- Pochat, Donoso & Saldarriaga (2018), *Proceso regional de las américas foro mundial del agua 2018, América del Sur / Resumen Ejecutivo*. Banco Interamericano de desarrollo, Universidad de los Andes.
- SSPD (2017), *Estudio sectorial de los servicios públicos domiciliarios de acueducto y alcantarillado 2016*. Superintendencia de Servicios Públicos Domiciliarios, Colombia.
- SSPD (2018), *Estudio sectorial de los servicios públicos domiciliarios de acueducto y alcantarillado 2014 - 2017*. Superintendencia de Servicios Públicos Domiciliarios, Colombia.